

Condutividade eléctrica aparente do solo (ECa) como complemento de amostragens regular e dirigida em cartografia detalhada

Apparent soil electrical conductivity (ECa) with regular and purpose sampling in detailed mapping

Carlos Alexandre

*Departamento de Geociências e Instituto de Ciências Agrárias Mediterrâneas (ICAAM)
Universidade de Évora, cal@uevora.pt*

Resumo

A necessidade de adaptar a gestão agrícola e florestal às condições específicas do solo tem levado a uma utilização crescente de métodos geofísicos na prospecção de solos à escala da parcela agrícola. Contudo, os resultados obtidos por estes métodos requerem uma calibração para os solos e outras condições ambientais prevalentes a nível local e regional. O presente estudo aproveita um levantamento de solos realizado nos ensaios do "Olival Novo" (27 ha) nos Lameirões (DRAAL, Moura) para testar a aplicação da condutividade eléctrica aparente do solo (ECa) na cartografia de solos à escala da parcela agrícola, no Alentejo. O levantamento de solos envolveu uma amostragem regular para caracterização da diversidade de solos (55 sondagens manuais), seguida de uma amostragem para caracterização dos solos mais representativos (24 sondagens mecânicas). No levantamento da ECa utilizou-se um equipamento de indução electromagnética (Duaem 1) com dois sensores. Obtiveram-se coeficientes de correlação (R) muito baixos da ECa com a profundidade máxima observada (0,10) e com a argila da camada 30-100 cm (0,25) medidas na amostragem regular. No caso da amostragem dirigida o R subiu para 0,45 e 0,74, respectivamente, chegando a 0,82 para a capacidade de troca do solo (30-100 cm). O R para a camada 0-30 cm deu sempre correlações inferiores. Compararam-se os mapas isopleto obtidos por diferentes métodos geoestatísticos, com destaque para a cokrigagem das variáveis edáficas, obtidas por amostragem regular e dirigida, usando a ECa como variável auxiliar. Na cokrigagem utilizou-se cerca de metade dos valores de cada amostragem (N=24 na regular e N=11 na dirigida) constituindo os restantes pontos um conjunto de validação (N=37). A raiz do erro quadrado médio (RMSE) da validação da profundidade do solo deu 16,2 e 16,3 cm, respectivamente com os 24 pontos da amostragem regular e com os 11 da amostragem dirigida, embora o R entre valores observados e estimados tenha sido muito baixo ($<0,2$). No caso da argila (30-100 cm) obteve-se RMSE de 94 e 107 g kg⁻¹, respectivamente, e um R semelhante com ambas as amostragens ($>0,4$). Estes resultados sugerem que a ECa permite reduzir a amostragem de solos, sendo mais eficiente do que a amostragem regular como método de delimitação das áreas para caracterização do solo por amostragem dirigida.

Abstract

The need to adapt agriculture and forestry management to specific soil conditions has led to an increased use of geophysical methods for soil survey at farm and plot level. However, these methods have to be calibrated for soils diversity and general environmental conditions prevailing at local and regional scale. This study uses a previous soil survey of a long term olive grove trial ("Olival Novo", 27 ha, Lameirões, Moura) to test the application of apparent soil electrical conductivity (ECa) for soil mapping at plot scale in Alentejo region. Soil survey consisted in two sampling schemes: (i) regular sampling to characterize soils diversity (55 profiles by manual probing) and (ii) purpose sampling for characterization of the most representative soils (24 profiles by mechanical probing). The geoelectric survey used electromagnetic induction equipment (Duaem 1) with two sensors. Regular sampling gave very low correlation coefficients (R) between ECa and observed soil depth (0,10), and average clay content in the 30-100 cm layer (0,25). For purpose sampling R rose to 0,45 and 0,74, respectively, up to 0,82 for the cation exchange capacity (30-100 cm). For the 0-30 cm layer correlations were always lower. Both sampling were compared for isopleth maps generation by means of geostatistical methods, with emphasis on cokriging using the ECa as an auxiliary variable. Cokriging was made with half of the samples (N=24 for regular sampling and N=11 for purpose sampling) and the remaining samples were used as a validation set (N=37). The root mean squared error (RMSE) of the observed soil depth gave 16.2 and 16.3 cm, respectively with in the regular sampling (N=24) and the purpose sampling (N=11), but correlation between observed and predicted values was very low ($R < 0.2$). For clay (30-100 cm) RMSE was 94 and 107 g kg⁻¹, respectively, and R was relatively low for both samples ($R > 0.4$). These results suggest that

ECa can be more efficient than regular sampling as a method for delimitation of main soil units in a given area, allowing a reduction of samples needed for its characterization by purpose sampling.

Introdução

A necessidade de uma gestão agrícola e florestal mais sustentável, tanto do ponto de vista ambiental como económico, tem levado a uma melhor adaptação dessas práticas às condições específicas do terreno. Uma das maiores limitações para a prossecução deste objectivo resulta da dificuldade em obter um melhor conhecimento do recurso do solo à escala da exploração e da parcela agrícola, principalmente, pela falta de metodologias que permitam um bom equilíbrio entre a fiabilidade de caracterização do solo e o custo da sua implementação. Neste contexto, os métodos geofísicos e, em particular, os geoelectricos têm-se destacado na prospecção de solos em grandes escalas cartográficas, nomeadamente à escala da parcela agrícola (ex: Corwin & Lesch, 2003). Contudo, os resultados obtidos por estes métodos, expressos geralmente pela condutividade eléctrica aparente (ECa) do solo, requerem uma calibração para os solos e outras condições ambientais prevalentes a nível local e regional. O presente estudo utiliza um levantamento de solos à escala da parcela agrícola (Alexandre & Afonso, 2007) para analisar a relação entre características importantes para o uso do solo e os valores de ECa obtidos num levantamento geoelectrico da mesma parcela. Com os dados da ECa testam-se também métodos geoestatísticos de elaboração de mapas detalhados de solos com recurso a um número reduzido de amostras.

Materiais e métodos

Este estudo realizou-se na Herdade dos Lameirões, da Direcção Regional de Agricultura do Alentejo (DRAAL), em Safara, concelho de Moura. A área do levantamento abrange cerca de 35 ha, dos quais 27 ha correspondem às parcelas de ensaios do “Olival Novo” (Figura 1). Trata-se de uma área alongada na direcção NE-SW, cortada por várias linhas de água na direcção quase perpendicular (SE-NW). Devido à inserção das linhas de água existem várias encostas com exposição NE e SW, algumas delas com declives máximos entre 15% e 20%. A altitude varia entre 175 e 187 m. Segundo a Carta de Solos de Portugal, a área do “Olival Novo” abrange 5 unidades cartográficas, das quais 4 são complexos de famílias da Classificação dos Solos de Portugal (CSP). É de salientar a grande diversidade de solos nesta área, tendo Alexandre & Afonso (2007) identificado 22 famílias da CSP e 26 unidades da World Reference Base for Soil Resources (WRBSR, 2006). No mesmo trabalho pode encontrar-se informação mais detalhada sobre a geologia e os solos da área em estudo. Para evitar grandes perturbações sobre os ensaios do olival, optou-se pela realização de sondagens para a prospecção do solo. Adoptou-se uma densidade de amostragem equivalente à escala 1:7.500, envolvendo um total de 79 sondagens: (i) 55 sondagens manuais numa amostragem regular (Re), para caracterização preliminar da diversidade de solos; (ii) 24 sondagens mecânicas segundo uma amostragem dirigida (Di), para caracterização analítica dos solos mais representativos. Os métodos analíticos são referidos em Alexandre & Afonso (2007).

Para o levantamento da ECa utilizou-se um equipamento de indução electromagnética ¹Dualem 1 (Dualem, Inc., 2008). Este equipamento apresenta um transmissor electromagnético de frequência constante e dois receptores a 1 m de distância daquele. Um dos receptores tem a bobina com enrolamento horizontal (paralelo à superfície do solo), tal como o transmissor, formando com este um *horizontal coplanar array* (H), sensível às propriedades eléctricas do solo até cerca de 1,5 m de profundidade. O outro receptor tem a bobina com enrolamento perpendicular à superfície do solo formando, com o transmissor, um *perpendicular array* (P) com sensibilidade até cerca de 0,5 m de profundidade (Dualem, Inc., 2008).

O levantamento geoelectrico foi realizado a 12/04/2011, por leitura contínua e registo da ECa em intervalos de 5 s. O equipamento foi transportado a cerca de 20 cm de altura acima do solo, o que faz com que ECa(P) e ECa(H) integrem as características do solo até cerca de 30 cm e 130 cm, respectivamente. Repetiram-se leituras em alguns pontos que permitiram detectar uma ligeira tendência de variação da ECa ao longo do tempo (*drift*). A temperatura registada no Dualem 1 variou entre os 26 e os 37°C e a ECa foi corrigida para os 30°C por regressão linear. O solo estava seco na camada superficial. Não houve precipitação na quinzena anterior ao levantamento e, embora o mês de Março tenha totalizado cerca de 70 mm (Santos & Maia, 2012), na 2ª quinzena de Março registaram-se menos de 10 mm.

¹ A referência a marcas comerciais visa apenas o cabal esclarecimento dos equipamentos usados.

A ECa foi relacionada com as seguintes variáveis (Quadro 1): profundidade máxima observada (PMO); teor de argila (G); capacidade de troca catiónica (T). G e T correspondem aos valores médios para as camadas 0-30, 30-100 e 0-100 cm. T foi determinada apenas na amostragem Di.

Destas variáveis a PMO é a que apresentou um maior desvio relativamente à distribuição normal, com uma cauda um pouco mais pronunciada à esquerda. Contudo, não foram feitas quaisquer transformações de variáveis. No caso da amostragem Di também foram usadas a massa volúmica aparente e a massa de elementos grosseiros para cálculo de variáveis compostas de G e T.

A ECa foi estimada para os pontos onde se realizaram as sondagens por krigagem normal (*ordinary kriging, OK*), usando uma matriz com células de 2x2 m. Testaram-se modelos de variograma isotrópicos e anisotrópicos (Quadro 2), tendo sido adoptados os segundos por revelarem menor variância do erro e um pouco melhores resultados na validação cruzada (Quadro 3). O modelo anisotrópico parece traduzir melhor a segmentação da área em estudo, cortada por quatro linhas de água aproximadamente na direcção SE-NW. Os mapas obtidos são apresentados na Figura 2.

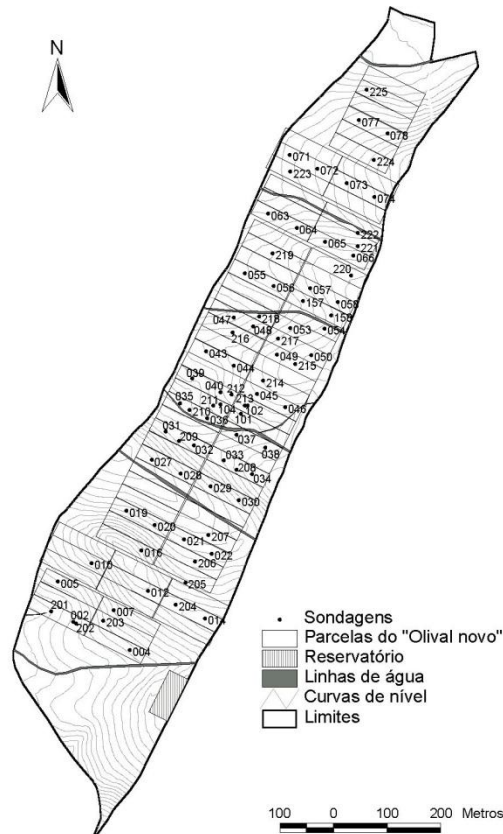


Figura 1 – Parcelas e sondagens realizadas. A área total do “Olival Novo” tem 42 ha, o levantamento (parcelas e áreas adjacentes) 35 ha e as parcelas totalizam 27 ha.

Quadro 1 – Variáveis edáficas utilizadas neste trabalho. Número de pontos usados e principais parâmetros estatísticos descritivos (Q representa quartis).

Variáveis ¹	Unidades	N	Min.	1ºQ	Mediana	Média	3ºQ	Máx.
ECa (P)	mS m ⁻¹	2890	5,82	18,70	27,02	29,48	37,63	85,36
ECa (H)	mS m ⁻¹	2890	4,12	28,20	39,30	43,84	55,25	137,42
PMO-Re	cm	55	37,00	75,00	85,00	82,93	95,00	115,00
PMO-Di	cm	24	61,00	84,25	90,50	88,00	95,25	103,00
G-Re (0-30)	g kg ⁻¹	50	110,2	281,7	365,0	370,8	416,4	699,1
G-Di (0-30)	g kg ⁻¹	23	101,8	257,8	355,9	345,7	439,6	651,8
G-Re (30-100)	g kg ⁻¹	50	114,7	288,7	381,2	374,6	450,3	688,9
G-Di (30-100)	g kg ⁻¹	23	115,2	292,1	371,5	351,5	427,7	526,9
T-Di (0-30)	cmol(+) kg ⁻¹	23	14,05	20,64	21,75	22,61	25,81	33,42
T-Di (30-100)	cmol(+) kg ⁻¹	23	14,71	19,95	22,07	23,02	26,43	33,09

¹ ECa – condutividade eléctrica aparente do solo, (P) na espessura 0-30 cm e (H) na espessura 0-130 cm; PMO – profundidade máxima observada do solo; G – teor de argila; T – capacidade de troca catiónica; (0-30) e (0-100) – espessuras em cm a que se referem os valores médios de G e T; Re e Di – amostragem regular e amostragem dirigida, T só foi determinada na amostragem Di.

Quadro 2 – Variogramas de modelo esférico testados para ECa (mS m^{-1}).

Variável	Pepita	Patamar	Amplitude	Observações
ECa (P)	38,6	165	195,4	Variograma omnidireccional
ECa (H)	41,9	461	206,0	Variograma omnidireccional
ECa (P)	35,0	60	162,4	Anisotrópico (ângs. c/ N: 10°, 100°)
ECa (H)	24,4	200	219,5	Anisotrópico (ângs. c/ N: 12°, 102°)
		310		

Quadro 3 – Variância do erro e validação cruzada da OK para ECa (P e H, mS m^{-1}) com variogramas omnidireccionais (Om.) e bidireccionais (An.).

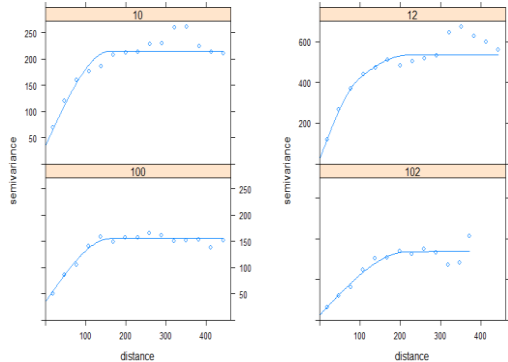


Figura 1 – Variogramas bidireccionais aplicados à ECa(P) (esquerda) e à EC(H) (direita).

Var.	Mod.	Variânc. Mediana	Validação cruzada		
			RMSE	R(e-o)	R(e-r)
ECa(P)	Om.	58,13	5,598	0,967	0,102
	An.	55,02	5,135	0,931	0,079
ECa(H)	Om.	87,84	5,181	0,930	0,079
	An.	61,54	5,703	0,965	0,043

RMSE – raiz quadrada do erro quadrado médio; R(e-o) – coef. corr. entre valores estimados e observados; R(e-r) – coef. corr. entre valores estimados e resíduos.

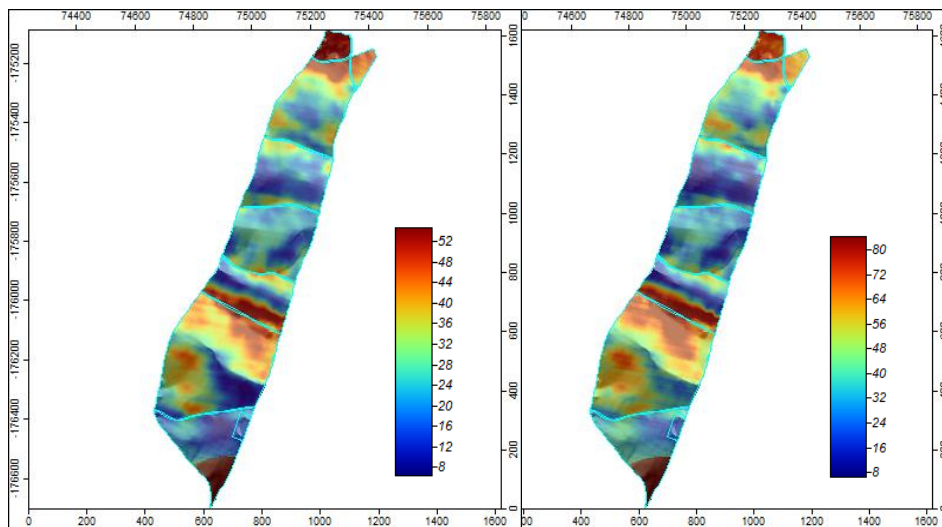


Figura 2 – ECa(P) (esquerda) e EC(H) (direita) obtidas por OK. Escalas em mS m^{-1} e distâncias em m.

Usando a ECa(P) como variável auxiliar testaram-se os métodos geoestatísticos de krigagem com deriva externa (KED) e de cokrigagem (CK) para estimar as variáveis edáficas PMO e G(30-100). Os resultados foram avaliados por validação-cruzada e validação. Para esta última, as amostras Re e Di foram divididas aproximadamente em duas metades, no caso Re, por amostragem aleatória ($N=25$) e no caso Di, por selecção ($N=11$) tendo em tenção dois critérios: incluir os solos mais diversificados e abarcar a totalidade da área em estudo. Os pontos das amostragens Re e Di não usados nos cálculos ($N=37$) serviram para validar os resultados, comparando as estimativas com os valores observados. Os cálculos geoestatísticos realizaram-se em R, com a *package gstat* (Pebesma, 2004). Privilegiou-se o ajustamento automático dos variogramas. Os mapas são apresentados com recurso ao SAGA GIS (2011).

Resultados e discussão

No Quadro 4 apresentam-se os coeficientes de correlação entre algumas variáveis edáficas seleccionadas e os valores de ECa(P) e ECa(H), estes estimados por OK para os mesmos pontos geográficos onde foi realizada a amostragem regular (Re) e a amostragem dirigida (Di).

Quadro 4 – Coeficientes de correlação entre ECa (P) e (H) e as variáveis edáficas obtidas por amostragem regular (Re, c/ sonda manual) e amostragem dirigida (Di, c/ sonda mecânica). Significância de R: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; restantes são não significativos

Variáveis ¹	Unidades	Regular+Dirigida		Regular (N=50) ²		Dirigida (N=23) ²	
		ECa(P)	ECa(H)	ECa(P)	ECa(H)	ECa(P)	ECa(H)
PMO ²	cm	0,15	0,06	0,07	-0,04	0,45*	0,41*
G(0-30)		0,08	0,00	-0,01	-0,08	0,32	0,25
G(30-100)	g kg ⁻¹	0,38***	0,33**	0,29	0,23*	0,73***	0,74***
G(0-100)		0,32**	0,26*	0,22	0,15	0,72***	0,70***
G.E(0-100)	g dm kg ⁻¹	0,38***	0,29*	0,25	0,15	0,75***	0,71***
T(0-30)		-	-	-	-	0,48*	0,33
T(30-100)	cmol(+) kg ⁻¹	-	-	-	-	0,82***	0,76***
T(0-100)		-	-	-	-	0,77***	0,67***
T.E(0-100)	cmol(+)dm kg ⁻¹	-	-	-	-	0,80***	0,70***
T.E.Mva.TF(0-100)	mol m ⁻²	-	-	-	-	0,76***	0,65***

¹ ECa – condutividade eléctrica aparente na espessura 0-30 cm (P) e 0-130 cm (H); PMO – profundidade máxima observada do solo; G – argila; T – capacidade de troca catiónica; (0-30) e (0-100) – espessuras (cm) dos valores médios de G e T; E, espessura, Mva, massa volúmica aparente e TF fracção de terra fina (< 2 mm).

² No caso de PMO, N=55 para a amostragem Re, N= 24 para Di e N=79 para Re+Di.

No Quadro 4, para além das variáveis base, teor de argila média (G) e capacidade de troca catiónica média (T) são apresentadas algumas variáveis compostas que resultam de multiplicar G ou T pela espessura dos horizontes (E), pela massa volúmica aparente (Mva) e pela fracção da terra fina (TF). O leque de variáveis compostas testado incluiu ainda os casos anteriores divididos pelo declive do terreno na área das sondagens, calculado a partir de um modelo digital de terreno da área em estudo. De todas as variáveis compostas testadas para as 3 camadas (0-30, 30-100 e 0-100 cm), incluem-se no Quadro 4 apenas os casos com coeficientes de correlação mais altos. Segundo alguns autores a ECa apresenta com frequência distribuição log-normal (Hendrickx et al., 1992). Neste estudo essa distribuição não foi evidente e a transformação logarítmica não acrescentou melhorias significativas nas correlações obtidas.

Constata-se que as melhores correlações foram obtidas entre ECa(P) e as variáveis edáficas da amostragem Di. ECa(H) só revelou uma correlação ligeiramente melhor com G(30-100), também na amostragem Di. As correlações obtidas justificam as seguintes observações: a) o factor mais determinante parece ser o tipo de amostragem do solo com a amostragem dirigida a apresentar correlações muito superiores às da amostragem regular ou ao conjunto das duas; b) a ECa(P), que reflecte as características da camada 0-30 cm, tende a apresentar melhores correlações do que a ECa(H), mesmo para as camadas 30-100 cm e 0-100 cm; c) as variáveis base (G e T) tendem a apresentar melhores correlações para a camada 0-30 cm e as variáveis compostas para a camada 0-100 cm.

a) Começando pela primeira das observações referidas deve discutir-se o significado da diferença entre os dois tipos de amostragem realizados: regular, com sonda manual (Re) e dirigida, com sonda mecânica (Di). Para isso são de admitir pelo menos três razões para as diferenças de correlação verificadas entre ECa e as variáveis edáficas: i) maior variabilidade nas amostras recolhidas com sonda manual, em virtude da sua muito pequena dimensão (cerca 2,5 cm de diâmetro); ii) factor aleatório, dado que $N(\text{Re}) > 2N(\text{Di})$; iii) diferenças inerentes ao tipo de amostragem. (i) A menor dimensão das amostras obtidas com sonda manual pode aumentar a variabilidade da determinação de variáveis edáficas como a textura, o teor de argila ou outras. No entanto, a profundidade máxima observada nos mesmos pontos deveria dar valores muito próximos com ambos os tipos de sondagens. Comparando o comportamento dos coeficientes de correlação para a PMO e da argila para ambas as amostragens verifica-se o mesmo padrão, ou seja, um R na amostragem Di muito superior ao obtido na amostragem Re – enquanto para G(30-100) o valor de R obtido para Di é 2-3 vezes superior ao obtido para Re, no caso da PMO (e

também de G(0-30)) essa diferença é ainda superior, contrariando o pressuposto estabelecido inicialmente. (ii) Realizaram-se testes com extracção aleatória de amostras obtidas com sonda manual em igual número às obtidas com sonda mecânica e que continuaram a revelar coeficientes de correlação muito baixos. Para 100 extracções obtiveram-se coeficientes de correlação compreendidos entre -0,40 e 0,37 (sendo $R < 0,24$ em 99% dos casos) para a PMO e -0,24 e 0,61 (com $R < 0,58$ em 99% dos casos) para G(30-100). Deste modo, mesmo reduzindo as amostras regulares para o mesmo número das sondagens mecânicas, será muito improvável atingir valores de R iguais aos obtidos com a amostragem Di. (iii) Por último, parece poder concluir-se que as diferenças de correlação entre os dois tipos de amostragens se devem, principalmente, à natureza regular da primeira e dirigida da segunda, centrando-se esta última em locais onde à partida se prevê existirem maiores diferenças entre os solos da área em estudo.

b) Quanto ao facto de ECa(P) apresentar correlações ligeiramente melhores do que a ECa(H), mesmo para a camada 30-100 cm (com excepção para G(30-100)), podemos tirar pelo menos duas conclusões: por um lado, ECa(P) poderá reflectir a ECa até uma maior profundidade do que os 0-30 cm previamente assumidos e, por outro, as características do solo a maior profundidade (> 50-60 cm) não melhoram a relação com a ECa medida pelo sensor H (sensível até 130 cm ou mais), o que faz supor que o horizonte B tem um papel relevante para as correlações obtidas e que, na sua maioria, é detectável pelo sensor P.

c) As variáveis compostas adicionam a influência de outras variáveis edáficas sobre G e T. Verifica-se que há apenas uma ligeira melhoria de correlações relativamente às variáveis base (G e T) para a camada 0-100 cm, o que sugere uma maior influência de G e T sobre a ECa comparativamente às outras variáveis como a massa volúmica aparente, a fracção de terra fina ou mesmo a espessura dos horizontes.

Farahani *et al.* (2005) obteve correlações de ECa com G e com T médias, para 0-30 cm e 0-90 cm ligeiramente superiores (entre 0,82 e 0,96) às observadas no presente estudo para a amostragem Di. Por outro lado Sudduth *et al.* (2005) obtiveram correlações da ECa com G e com T, para a camada 0-30 cm, respectivamente, entre 0,61 e 0,79 e entre 0,39 e 0,88. Estas correlações foram mais baixas para os valores médios do perfil, entre 0,47 e 0,69 para G e entre 0,37 e 0,81 para T. Os sensores utilizados neste estudo tinham especial sensibilidade para a espessura 0-30 cm, o que pode justificar a maior diferença que se verifica relativamente ao presente trabalho, que apresenta muito baixas correlações para esta espessura. Admite-se que as baixas correlações da ECa(P) para a camada 0-30 cm se devem, não só a uma maior influência das características do solo até aos 50-60 cm de profundidade, como, também, à concentração de humidade nos horizontes subsuperficiais à data da realização do levantamento geoelectrico. Além disso, é de salientar que a abordagem usada tem especial interesse pela sua facilidade de aplicação, mas enferma de pelo menos dois tipos de erro evidentes: erros de interpolação (a ECa é estimada para os pontos onde foram realizadas as sondagens) e erros de comparabilidade nos suportes ou unidades de amostragem (as leituras da ECa abrangem áreas de 5 a 10 m² enquanto as sondagens não vão além de 100 cm²).

Dada a grande diferença de correlações entre ECa e as variáveis edáficas obtidas por amostragem regular e dirigida comparou-se o potencial da ECa para estimar as variáveis PMO e G(30-100) com ambos os tipos de amostragem. O Quadro 5 tem os resultados da validação cruzada e da validação para a cokrigagem de PMO e G(30-100), usando cerca de metade das amostras Re e Di, com ECa(P) como variável auxiliar. Para efeitos comparativos inclui-se no mesmo quadro os resultados da OK, da KED e da CK usando todos os pontos das amostras Re e Di, não se apresentando, por isso, resultados de validação.

Justificam-se as seguintes observações: a) muito má correlação entre valores observados e estimados obtidos na validação da CK da PMO, para as duas amostras ½Re e ½Di; b) mesmo com a totalidade dos pontos da amostragem Re e Di a OK apresenta uma correlação da validação cruzada muito baixa, que se deve a uma grande variabilidade da PMO a pequena distância, o que originando um variograma experimental de quase efeito pepita puro e que explica, também que a CK com todos os pontos de Re+Di não represente qualquer melhoria relativamente aos resultados obtidos pela OK; c) no caso de G(30-100) a validação para as amostras ½Re e ½Di apresentam correlações entre pontos observados e estimados um pouco melhores que para PMO e muito semelhantes entre si, apesar da amostra ½Di (N=11) corresponder apenas a metade dos pontos da ½Re (N=22), o que pode justificar que o valor de RMSE seja ligeiramente superior para ½Di; d) utilizando a totalidade dos pontos (Re+Di), a CK de G(30-100) também não apresenta melhores resultados na validação cruzada relativamente à OK e apenas a variância do erro das estimativas se reduz, beneficiando da variável auxiliar ECa. Verifica-se o mesmo para a KED mas com resultados ligeiramente inferiores à CK na variância do erro e um pouco melhores na validação cruzada.

Quadro 5 – Resultados da krigagem normal (OK) de PMO e G(30-100) e da krigagem com deriva externa (KED) e cokrigagem (CK) usando ECa(P) como variável auxiliar.

Variáveis	Mét.	Amost. ¹	N	Variância Median a	3ºQ	Valid. cruzada RMSE	R(o-e) R(o-e)	Validação RMS E	R(o-e)
PMO (cm)	OK	Re+Di	55+24	90,3	159,5	15,7	0,188	-	-
		Re+Di	79+289	244,1	244,2	14,7	0,032	-	-
	CK c/ ECa	½Re	25+289	396,0	479,5	20,0	-	16,2	0,082
			0				0,056		
		½Di	11+289	105,8	118,1	7,1	0,803	16,3	-0,175
			0						
G(30-100) (g kg ⁻¹)	OK	Re+Di	50+23	7424	10119	92,7	0,505	-	-
		KED Re+Di	73+289	8697	9260	87,8	0,572	-	-
	CK c/ ECa	Re+Di	73+289	3516	4137	92,5	0,526	-	-
			0						
		½Re	25+289	17610	17780	121,3	0,113	93,8	0,425
			0						
		½Di	11+289	3273	4423	64,6	0,814	106,7	0,447
			0						

¹ Re e Di correspondem aos dados das amostragens regular e directa e a ½ desses dados; 3ºQ – 3º quartil da variância do erro; RMSE – raiz quadrada do erro quadrado médio; R(o-e) – coef. corr. entre valores estimados e observados; PMO – profundidade máxima observada; G(30-100) – teor de argila médio na camada 30-100 cm.

É de salientar que a validação cruzada com melhores resultados é a obtida com ½Di, tanto para PMO como para G(30-100), traduzindo as melhores correlações obtidas com ECa no caso desta amostragem. Apesar disso, o teste de validação aplicado aos pontos de amostragem não usados na CK, dá resultados, (RMSE e R entre valores observados e estimados), bastante fracos, em especial para a PMO.

A Figura 3 apresenta os mapas isopleto de G(30-100), obtidos por OK com a totalidade dos pontos amostrados (N(Re+Di)=72, à esquerda) e obtidos por CK com metade da amostragem directa (N(½Di)=11, à direita), usando ECa(P) como variável auxiliar.

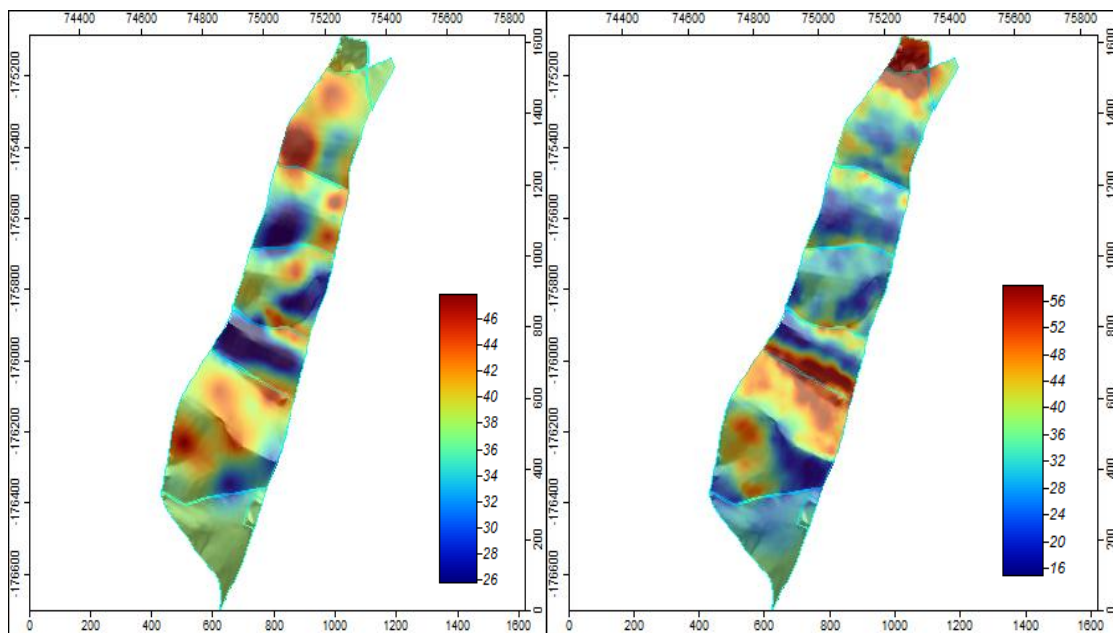


Figura 3 – Mapas de G(30-100), obtidos por OK com a totalidade dos pontos amostrados (N(Re+Di)=72, à esquerda) e por CK com metade da amostragem directa (N(½Di)=11, à direita), usando ECa(P) como variável auxiliar. As legendas indicam a % média de argila na camada 30-100 cm. Distâncias em m.

É evidente a influência que o padrão espacial da ECa imprime ao mapa da CK (direita), por contraste com o aspecto típico de processos de difusão, mas mais artificial, que predomina no mapa da OK (esquerda). O mapa obtido por OK apresenta também uma amplitude de valores que é apenas cerca de metade ($\sim 200 \text{ g kg}^{-1}$) da amplitude do mapa da CK ($\sim 400 \text{ g kg}^{-1}$). A ECa introduz maior detalhe e, embora os resultados da validação evidenciem limitações nas estimativas obtidas, tem especial significado o seu potencial para produzir mapas detalhados a partir de pequenas amostras de solo, neste caso apenas 11 sondagens.

Conclusões

As correlações obtidas entre a ECa e algumas características do solo (espessura de solo, teor de argila e capacidade de troca) revelam algumas limitações quanto ao potencial de calibração da ECa para traduzir estas características isoladamente. Revelam também a grande variabilidade que se pode verificar consoante o tipo de amostragem de solo adoptado, obtendo-se as melhores correlações para uma selecção de solos bem diferenciados (amostragem dirigida). A ECa revela-se mais eficiente do que a amostragem regular como método de delimitação dos solos mais representativos numa dada área e permite reduzir a amostragem necessária para a sua caracterização por amostragem dirigida.

Agradecimentos

Trabalho realizado no âmbito do projecto AGRO N° 298, coordenado pela Profª. Maria da Conceição Castro, da Universidade de Évora, a quem se agradece a colaboração prestada para esta componente do projecto. Agradece-se também à DRAAL todas as facilidades concedidas para a realização deste trabalho.

Bibliografia

- Alexandre, C. & Afonso, T. 2007. Cartografia de solos à escala da exploração agrícola: aplicação a um ensaio de olival. *Revista de Ciências Agrárias*, Vol. 30, (1) 17-32. <http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/rca/v30n2/v30n2a16.pdf>
- Corwin, DL & Lesch, SM. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95, (3) 455-471.
- Dualem, 2008. *DUALEM-1, DUALEM-2, User's Manual. Version 43*, Dualem, Inc, p. 36. www.dualem.com (em 8/06/2012).
- Farahani, H.J., Buchleiter, G.W., & Brodahl, M.K. 2005. Characterization of soil electrical conductivity variability in irrigated sandy and non-saline fields in Colorado, *Trans. ASAE*, 48, 155-168.
- Hendrickx, J.M.H., B. Baerends, Z.I. Raza, M. Sadiq, and M. Akram Chaudhry. 1992. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1933-1941.
- Pebesma, Edzer J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computers & Geosciences*, 30: 683-691.
- SAGA, 2011. System for Automated Geoscientific Analyses, Version: 2.0.8. <http://www.saga-gis.org>
- Santos M. & Maia J. 2012. *Climatologia agrícola. Ano de 2011*. Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio. Beja. 12 p. <http://www.cotr.pt/documentos/Climatologia2011.pdf> (em 8/06/2012).
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Wiebold, W.J., Batchelor, W.D., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Clay, D.E., Palm, H.L., Pierce, F.J., Schuler, R.T. & Thelen, K.D. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 263-283.